

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

КОВАЛЕНКО Алла Александровна

Выпускная квалификационная работа

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАВИН РАЗЛИЧНОГО ТИПА И РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЛАВИН**

Направление 05.04.04 «Гидрометеорология»

Основная образовательная программа магистратуры ВМ.5779.2018

«Гидросфера и атмосфера: моделирование и прогноз»

Научный руководитель: к.г.н., доц., с.н.с.

ВИНОГРАДОВА Татьяна Александровна

Научный консультант: к.г.-м.н., доц.,

КАЗАКОВ Николай Александрович

Рецензент: к.г.н., с.н.с.

ПISKУН Александр Александрович

Санкт-Петербург

2020

Содержание

Введение	3
Глава 1. Классификации лавин.....	4
Глава 2. Математические модели движения лавин.	10
Глава 3. Краткое описание исследуемых объектов.	12
Глава 4. Методы расчета неустановившегося движения с помощью одномерной модели.	15
4.1. Методы расчета неустановившегося движения.	15
4.2. Уравнение Сен-Венана. Основные допущения.	16
4.3. Численная схема Института гидродинамики СО АН СССР.	18
4.4. Исходная информация для расчета неустановившегося движения воды.	19
Глава 5. Создание информационной базы для моделирования и расчета.....	21
5.1. Методика определения динамических характеристик по видеоматериалам. ..	21
5.2. Выбор расчетных участков и интервалов по времени и длине.	23
5.3. Гидравлично-морфометрические характеристики.	25
5.4. Задание начальных и граничных условий.....	28
5.5. Задание коэффициентов сопротивления.	29
5.6. Внесение данных в оболочку модели.....	31
5.7. Вывод результатов.	32
Глава 6. Результаты моделирования.....	33
Заключение	36
Список литературы.....	37

Введение

Снежные лавины – опасное гидрометеорологическое явление, которое уносит человеческие жизни и наносит материальный ущерб не только в горах, но и на равнинах при небольших уклонах местности. Так как натурные методы получения динамических характеристик лавин имеют ряд проблем из-за мощного и стремительного развития лавинного процесса, то часто используют косвенные методы расчета и математические модели схода лавин, которые позволяют получить характеристики, необходимые для прогнозирования лавин и инженерной защиты в зоне лавинной опасности.

Целью выпускной квалификационной работы является расчет основных динамических характеристик лавин различного типа при помощи одномерной модели, основанной на численной схеме Института гидродинамики. Данная модель часто используется для расчета речных объектов, а также наносоводных селей и позволяет получить такие характеристики как скорости движения потока, расходы, уровни, площади поперечного сечения, числа Рейнольдса и Фруда. Чтобы рассчитывать движение лавинного тела по этой модели, необходимо рассмотреть лавину как непрерывный поток, состоящий из ледяных кристаллов, связанной и свободной воды и подчиняющийся законам гидравлики (Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В., 2017). Благодаря одномерной модели можно получить значительный объем характеристик движения лавины в каждый расчетный момент времени при сравнительно небольшом объеме исходных данных.

Для достижения цели были поставлены такие **задачи**, как:

1. Аналитический обзор классификаций лавин и основных математических моделей расчета.
2. Создание информационной базы для расчета: определение гидравлико-морфометрических характеристик, задание граничных и начальных условий, получение параметров модели.
3. Проведение расчетов, используя заданные параметры.
4. Анализ полученных результатов и их сравнение с наблюдаемыми данными.

Глава 1. Классификации лавин.

Лавиносбор, снежный покров, лавина и метеорологические условия определяют морфологию лавины (Лосев К.С., Божинский А.Н., 1987). За годы исследований было выяснено, что независимо от размеров все лавины имеют общие черты, одни и те же лавины могут повторяться как во времени, так и в пространстве (Mair R., Naitz P., 2013). Основываясь на общих чертах и закономерностях, была составлена **Международная морфологическая классификация лавин** (табл.1). Классификация помогает описать лавину на всех этапах ее развития, а именно в зонах зарождения, транзита и остановки. На основе этой классификации создан «Атлас лавин», который является пособием по наблюдению на снеголавинных станциях. Индексом «0» обозначаются позиции, которые не удалось наблюдать.

Таблица 1. Международная морфологическая классификация лавин
(Гляциологический словарь, 1984).

Зона	Критерий		Альтернативные характеристики лавин и их коды					
Зарождения	A	Тип начала движения	A1	Двинулась из точки (лавина из точки, лавина из рыхлого снега)			A2	Двинулась с линии (лавина от линии, лавина из снежной доски)
	B	Положение поверхности скольжения (поверхность обрушения)	B1	Внутри снежного покрова (лавина поверхностного слоя)			A3	Мягкая доска
			B2	В новом снежном покрове	B3	В старом снежном покрове	B4	Твердая доска
	C	Жидкая вода в снегу	C1	Отсутствует (сухая лавина)			C2	По грунту (лавина полной глубины)
Транзита	D	Форма пути	D1	Движение на ровном склоне (неканализованная лавина, неограниченная лавина)			D2	Движение в русле (лотке) (канализованная лавина, лотковая лавина)
	E	Тип движения	E1	Облако снежной пыли (пылевая лавина)			E2	Течение вдоль поверхности грунта (текучая лавина)
	F	Поверхностная шероховатость отложений	F1	Крупнокомковатые отложения			F4	Мелкокомковатые отложения
	E	Тип движения	F2	Угловатые блоки	F3	Окатанные комья		

Отложения	G	Жидкая вода в снежных отложениях во время остановки	G1	Отсутствует (сухие лавинные отложения)	G2	Имеется (Мокрые лавинные отложения)		
	H	Загрязнение отложений	H1	Нет ясного загрязнения (чистая лавина)	H2	Имеется загрязнение (загрязненная лавина)		
					H3	Скальные обломки, остатки почты	H4	Ветки, деревья
					H5	Обломки сооружений		

Генетическая классификация основана на условиях происхождения лавины, которые обусловлены метеорологическими явлениями и физическими процессами, происходящими в снежной толще (Виноградова Т.А., Казаков Н.А., 2017). Существует много различных генетических классификаций лавин. В данной работе приводятся две классификации - В.В. Дзюбы (табл.2) и Н.А. Казакова (табл.3), так как они включают в себя как гидрометеорологические факторы лавинообразования, так и особенности кристалло-морфологических характеристик снежной толщи с перестройкой ее структуры и текстуры (Виноградова Т.А., Казаков Н.А., 2017).

Таблица 2. Генетическая классификация снежных лавин (по В.В.Дзюбе).

Класс лавин	Тип лавин	Подтип лавин	Диагностические признаки лавин			
			Метеоусловия, предшествующие сходу лавин	Преимущественная форма отрыва	Стратиграфия снега выше поверхности срыва	Расположение поверхности скольжения в месте обрыва
I. Сингенетические лавины (вызванные увеличением сил, сдвигающих снег со склона вследствие прироста высоты снежного покрова)	1. Лавины снегопадов	—	Снегопад без метели	Точечная	Слой свежеснежавшего снега	Внутри свежеснежавшего снега или по контакту его со старым
	2. Лавины Общих метелей	—	Снегопад с метелью	Площадная	Слой свежеснежавшего переметенного снега	На контакте свежеснежавшего переметенного снега со старым, иногда внутри переметенного снега
	3. Лавины низовых метелей	—	Низовая метель или поземок	*	Слой переметенного снега	На контакте переметенного старого снега с нижележащим слоем, иногда внутри переметенного снега
II. Эпигенетические лавины (вызванные уменьшением сил, удерживающих снег на склоне без увеличения)	1. Лавины температурного разрыхления снега	а) вызванные ослаблением связей в глубине снежной толщи	Длительный морозный период, возможно сочетание с периодами снеготаяния	*	Один или несколько слоев старого снега	По ослабленной прослойке внутри снежной толщи или по грунту
		б) вызванные разрушением связей с поверхностью снежной толщи	Длительный морозный период практически без снеготложения	Точечная	Слой глубинной изморози	Внутри поверхностного разрыхленного горизонта, по контакту его со связанным слоем или по грунту

Класс лавин	Тип лавин	Подтип лавин	Метеоусловия, предшествующие сходу лавин	Преимущественная форма отрыва	Стратиграфия снега выше поверхности срыва	Расположение поверхности скольжения в месте обрыва
II. Эпигенетические лавины (вызванные уменьшением сил, удерживающих снег на склоне без увеличения)	2. Лавины ветрового разрыхления снега	—	Продолжительные сильные порывистые ветры при низкой влажности воздуха	Площадная	Один или несколько слоев старого снега	По ослабленной прослойке внутри снежной толщи или по грунту
	3. Лавины снеготаяния	а) вызванные образованием двухзонного по адгезионным свойствам снега	Потепление, интенсивная солнечная радиация в первые дни после снегопада	Точечная	Слой мокрого слабосвязанного снега	Внутри слоя слабосвязанного снега на контакте зон, различных по адгезионным свойствам
		б) вызванные увлажнением снега до значения его водоудерживающей способности	Сильное потепление	—	Один или несколько слоев мокрого слабосвязанного снега	По грунту или по водоупорной прослойке внутри снежной толщи
III. Полигенетические лавины (вызванные увеличением сил, сдвигающих снег со склона, при одновременном уменьшении сил, удерживающих снег на склоне)	1. Лавины, вызванные дождями	—	Дождь	—	То же	То же
	2–10. Комбинированные лавины	—	Длительный период с сильными морозами, ветрами или снеготаянием, непосредственно перед сходом лавины – снегопад, общая или низовая метель	Площадная	Один или несколько слоев старого и обязательно слой свежееотложенного снега	По ослабленной прослойке внутри старого снега или по грунту

Таблица 3. Генетическая классификация лавин (по Н.А. Казакову).

Генетический тип лавины	Плотность лавино-образующего снега, г/см ³	Характер движения лавины	Макс. объём лавины, тыс. м ³	Макс. дальность выброса лавины, м	Макс. скорость лавины, м/с	Преобладающие процессы, определяющие генезис лавин
I Генетический класс лавин: сингенетические лавины						
Метелевого снега (снежная доска)	0,20 - 0,50	Ламинарный Скольжение	5,0	400	30	Метеорологические процессы
Снеготаяния (мокрого снега)	0,15 - 0,50	Ламинарный Вязкое течение	5,0	300	15	Метеорологические процессы
Свежевыпавшего снега	0,05 - 0,15	Турбулентный	10,0	500	40	Метеорологические процессы
II Генетический класс лавин: эпигенетические лавины						
Перекристаллизованного снега	0,22 - 0,38	Турбулентный Волновой процесс	>50,0	>1000	>80	Геофизические процессы в снежной толще
III Генетический класс лавин: полигенетические лавины						
Смешанного перекристаллизованного и сухого свежевыпавшего снега	0,25 - 0,35	Турбулентный Волновой процесс	>1400,0	>3000	>80	Геофизические процессы в снежной толще в сочетании с гидрометеорологическими процессами

Все вышеперечисленные классификации помогают не только описывать и сравнивать лавины, но и облегчают их дальнейшее моделирование и прогноз.

Существует несколько видов характера движения лавин в зависимости от состояния и свойств лавинного снега (Москалев Ю.Д., 1977):

1. Движение облака из пылевого, порошкового снега, которое может сопровождать или обгонять более плотное ядро.
2. Турбулентное движение малосвязного сухого снега наподобие движения сыпучих материалов. Во время движения трение между частицами уменьшается и происходит своеобразное «разжижение» потока.

3. Движение обломков снежных плит. Между нижней поверхностью обломков плит и поверхностью скольжения может возникать эффект воздушной смазки.
4. Движение комьев снега – скольжение, качение, перемешивание.
5. Движение консолидированной массы влажного или мокрого снега наподобие течения пластического вещества или вязкой жидкости.
6. Турбулентное снежно-водяной смеси, иногда с примесью захватываемых потоком частиц грунта, наподобие движения селевых потоков.

Часто наблюдаются лавины с переходным движением из одной формы в другую (Войтковский К.Ф., 1989).

Глава 2. Математические модели движения лавин.

На сегодняшний день трудно адекватно описать движение лавины с помощью математических моделей. По большей части затруднения связаны с неопределенностью входных параметров, идеализацией процесса движения лавинного тела, сложных систем дифференциальных уравнений (Лосев К.С., Божинский А.Н., 1987). Поэтому вместо однозначного решения проблемы в виде единого математического аппарата существуют различные подходы к моделированию динамики снежных лавин (Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В., 2017).

Основными динамическими характеристиками снежной лавины являются: скорость и высота фронта; дальность выброса; ударные нагрузки, плотность лавинного потока. Все перечисленные характеристики изменяются в зависимости от физико-географических условий (Козик С.М., 1962). В лавинной практике используются одномерные, двумерные и трехмерные модели движения лавин. Хотя прогнозирование лавин и является трехмерной задачей, при исследованиях чаще моделируют на одномерных и двумерных моделях для сокращения размерности и объема вычислений.

Эмпирические модели основаны на статистической обработке данных наблюдений на лавинных станциях. Такие модели не учитывают физические процессы в теле лавины, что делает невозможным определение скорости движения лавины, глубины потока и давления (Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В., 2017). Однако, данный тип моделей хорошо использовать при оценке дальности выброса лавин.

Динамические модели, напротив, описывают именно физику процесса. Простейшей моделью движения лавин является **модель материальной точки**, в которой основное допущение заключается в замене реального лавинного тела движением его центра масс. Материальная точка движется по наклонной плоскости под действием силы тяжести, силы кулонова трения, сопротивления воздуха и сцеплением с подстилающей поверхностью (Лосев К.С., Божинский А.Н., 1987). Несмотря на очевидные минусы – модель не учитывает движение внутри лавинного тела, изменение его форм и размеров, - с помощью этой модели можно оценить такие характеристики, как скорость фронта и дальность выброса. В более поздних версиях модели лавина имеет изменяющуюся геометрию и деформацию своей формы в процессе движения (Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В., 2017).

В модели гидравлического типа тело лавины рассматривается как сплошная среда, типа несжимаемой жидкости, на которую действуют силы трения, турбулентного сопротивления и кулонова трения. Коэффициент кулонова трения определяется обратным путем и зависит от типа лавины и состояния скольжения, что делает его наиболее существенным параметром в модели (Лосев К.С., Божинский А.Н., 1987).

Математические модели пылевых лавин отличаются интенсивными процессами массообмена лавинного тела с воздухом и поверхностным снегом (Лосев К.С., Божинский А.Н., 1987). Моделирование осуществляется в виде блока, потока переменной плотности или двухфазного потока. В блочных моделях пылевая лавина рассматривается как материальная точка, описываемая обычными дифференциальными уравнениями, в которые вводятся дополнительные уравнения для учета движения центра масс и изменения размеров пылевого облака во времени (Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В., 2017). Модели плотности потока основываются на локальном балансе общей массы и линейного импульса, которые составляются для каждой из фаз.

Так как большинство реальных лавин имеют относительно плотное ядро, окруженное сильно разряженным снежно-воздушным облаком, то часто используют **смешанные модели**, основанные на двуслойном представлении лавинного тела. Например, в модели аэрозольная часть может описываться потоком из двух фаз – воздуха и снежных частиц в виде суспензии, - для каждой из которых законы сохранения массы и импульса рассматриваются отдельно (Naaim M., Gurer I., 1998).

Также разрабатываются альтернативные модели, такие как квазитрехмерная модель клеточных автоматов (Barpi F., Borri-Brunetto M., Veneri L. D., 2007). Лавина делится на маленькие элементы - элементарные автоматы, - которые взаимодействуют по простым законам. Каждый такой элементарный автомат характеризуется своей высотой: не разрушаемая высота (т.е. высота поверхности земли), разрушаемая высота (т.е. слой снежного покрова), высота потока, сосредоточенная кинетическая энергия (т.е. высота, соответствующая кинетической энергии на единицу массы материала снега, связанной с ячейкой) (Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В., 2017). Поток, переходя из одной ячейки в другую, изменяет их высоты. Основное предположение заключается в том, что система стремится к максимальной стабильности. Исходя из проведенных исследований, модель способна корректно воспроизводить трехмерный путь лавины и объем отложений (Barpi F., Borri-Brunetto M., Veneri L. D., 2007).

Глава 3. Краткое описание исследуемых объектов.

В рамках выпускной квалификационной работы было выбрано 2 объекта, по видеоматериалам которых проводилось моделирование неустановившегося движения.

Первым объектом исследования стала лавина, сошедшая в Via Bovile - небольшом населенном пункте, расположенном в 40 км севернее г. Больцано на южных склонах Альп, недалеко от границы Италии, Швейцарии и Австрии. Данный лавиносбор относится к лотковому типу и находится на высоте от 1354 м до 1675 м на южном склоне с редкой растительностью (рис.1). Также можно заметить, что растительность наблюдается преимущественно на границе лавиносбора, что свидетельствует о частоте схода лавин в этой местности. Так как видео не содержит записи о каких-либо предупредительных спусках, то можно утверждать, что на видеоматериале наблюдается естественный сход лавины. О линия отрыва лавинного тела судить трудно, так как съемка началась уже во время движения лавины по склону. В качестве объекта моделирования был взят участок, где лавина имеет ламинарное вязкое течение, небольшие скорости и движется по дну оврага, который является естественным руслом. При этом лавинное тело ломает хвойную растительность на своем пути и увлекает ее за собой. Также на пути лавины находится само поселение Via Bovile, часть жилых строений которого видна на рис.2.



Рисунок 1. Лавиносбор лоткового типа в Via Bovile (GoogleEarth). Пунктирной линией обозначены границы лавиносбора, стрелкой – направление схода лавины.



Рисунок 2. Кадр из видеосъемки схода лавины (ViaBovile, Италия).

По морфологической классификации лавина имеет код: A0 B0 C2 D2 E2 F1 G2 H4. Это лавина сингенетического класса, типа снеготаяния (мокрого снега). Лавина имеет ламинарное, вязкое течение. Такие лавины имеют плотность лавинообразующего снега от 0,15 до 0,50 г/см³. Они имеют небольшие скорости движения (до 15 м/с) и соответственно дальность выброса лавины достигает несколько сотен метров. При определении генезиса преобладающими процессами являются синоптические и метеорологические.

В качестве второго объекта была взята лавина, сошедшая в Андах на северном склоне горнолыжного курорта Cerro Catedral. Лавиносбор осовного типа расположен на высоте от 1930 до 2077 м (рис.3). Растительность отсутствует. На видеоматериале представлен весь путь схода лавины, поэтому было легко определить линию отрыва и причину возникновения лавины. Лавина была вызвана деятельностью сноубордиста и имела линию отрыва около 70 м. Тело лавины состоит из перекристаллизованного и сухого свежеснежавшего снега. По характеру течения имеет турбулентный волновой процесс (рис.4).

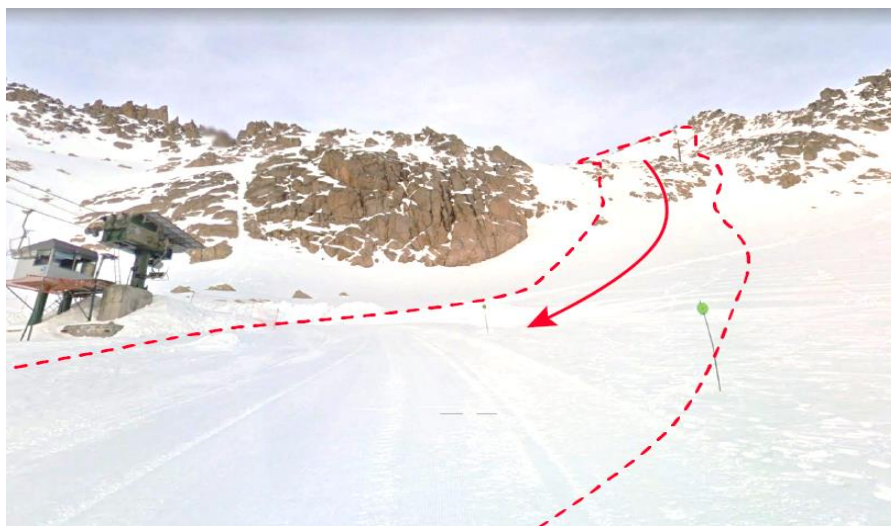


Рисунок 3. Лавиносбор в Cerro Catedral (GoogleEarth). Пунктирной линией обозначены границы лавиносбора, стрелкой – направление схода лавины.



Рисунок 4. Кадр из видеосъемки схода лавины (Cerro Catedral, Аргентина).

По морфологической классификации лавина имеет код: A2 B0 C1 D1 E1 F4 G1 H1. Лавина полигенетического класса, смешанного перекристаллизованного и сухого свежавыпавшего снега. Лавина имеет турбулентный характер движения. Говорить о плотности лавинообразующего снега трудно, так как ее измерение является сложной задачей. Скорость таких лавин может превышать 80 м/с, а дальность выброса измеряется в км. При определении генезиса преобладающими процессами являются геофизические процессы в снежной толще и гидрометеорологические процессы.

Глава 4. Методы расчета неустановившегося движения с помощью одномерной модели.

4.1. Методы расчета неустановившегося движения.

Чтобы рассчитывать движение лавинного тела с помощью одномерной модели, необходимо рассмотреть лавину как непрерывный поток, состоящий из ледяных кристаллов, связанной и свободной воды и подчиняющийся законам гидравлики (Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В., 2017). Характеристики этого непрерывного потока меняются во времени в каждом расчетном створе, поэтому в каждый отдельно взятый момент времени такие характеристики как расход, скорость, площадь поперечного сечения, глубина потока и т.д. будут различными по всей длине расчетного участка. Неустановившееся движение наблюдается в открытых руслах при прохождении волны. Одной из особенностей такого типа движения является то, что длина волны превышает глубину потока. В данной работе этой волной является тело лавины.

Существует две группы методов расчетов: строгие (гидродинамические) и упрощенные (инженерные). Первые основываются на решении системы уравнений Сен-Венана, которые вводятся с определенными допущениями. Строгие методы в основном применяются в проектной практике. При упрощённых методах уравнения не интегрируются и заменяются более простой в применении моделью нужного явления. Применяются упрощенные методы при недостаточном количестве исходной информации, чтобы использовать сложные строгие методы.

В зависимости от того, какие сведения должны быть получены на выходе, обычно выбирают одномерную или двумерную модель. При одномерном моделировании необходимо, чтобы такие переменные как скорость, глубина и т.д. изменялись в одном направлении, а именно вдоль потока (Alvarado A., Robinson D., 2012). При двумерном моделировании компоненты скорости вычисляются в двух направлениях. Одномерное моделирование требует, чтобы переменные (скорость, глубина и т. д.) изменялись преимущественно в одном определенном направлении (x) вдоль потока воды. Учитывая, что водотоки редко бывают прямыми, вычислительное направление принимается вдоль центральной линии водотока.

4.2. Уравнение Сен-Венана. Основные допущения.

Используемая в исследовании модель основывается на уравнениях Сен-Венана, которые описывают одномерное неустановившееся движение по открытому руслу под действием силы тяжести (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015). Уравнения мелкой воды можно применять для моделирования волн в атмосфере, реках, озёрах, океанах. Для корректного применения уравнения важно, чтобы горизонтальные размеры акватории были значительно больше глубины. Хотя уравнения никак не учитывают плотность вещества, данная система уравнений может быть применено и к лавине, так как тело лавины рассматривается непрерывным потоком ледяных кристаллов и воды, что не значительно отличает единицу плотности лавинного тела от единицы плотности речной или морской воды.

Система уравнений состоит из:

$$I = i_o - \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\alpha}{g} V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\beta}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V|V|}{C^2 R} + \frac{qV}{g\omega} \quad \text{уравнение динамического равновесия} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{уравнение неразрывности} \quad (2)$$

Независимыми переменными в уравнениях (1) и (2) являются x и t – независимые переменные (координата и время), их функции – глубина h и средняя скорость V .

ω – площадь живого сечения (м^2)

Q – расход ($\text{м}^3/\text{с}$)

C – коэффициент Шези

R – гидравлический радиус (для широкого открытого русла его можно заменить средней глубиной h)

g – ускорение свободного падения

α и β – коэффициенты, характеризующие неравномерность распределения скоростей по поперечному сечению

q – боковой приток на единицу длины. В случае его отсутствия правая часть уравнения (2) равна нулю.

i_o – уклон дна

$\partial h / \partial x$ – дополнительный уклон, связанный с изменением глубин по длине русла

I – поверхностный уклон

Первое слагаемое уравнения (1) отражает неравномерность течения по длине расчетного участка. Второе слагаемое уравнения (1) – уклон, который связан с изменением скоростей во времени. Таким образом первые два слагаемых – это инерционные члены – учитывают влияние скоростей течения. Третье слагаемое учитывает уклон трения, а четвертое боковую приточность (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015).

Ниже перечислены основные допущения при использовании уравнения Сен-Венана в моделировании (Виноградова Т.А., Никифоровская В.С., 2015):

1. Поперечные и вертикальные составляющие скорости принимаются очень малыми в сравнении с продольной составляющей скорости, поэтому они не учитываются, а скорость течения принимается одинаковой во всем поперечном сечении. Это означает что поперечным уклоном свободной поверхности также пренебрегается.
2. Не учитываются местные потери напора.
3. Глубина лавинного тела считается малой по сравнению с длиной волны, а плотность принимается постоянной по сечению.
4. Сила сопротивления в уравнении включает в себя суммарное влияние сил трения и турбулентности.
5. Уклон дна принимается малым по сравнению с единицей.

В отличие от рек, протекающим по извилистым руслам, лавина движется под действием силы тяжести по прямой вниз по склону, что позволяет считать русло лавины достаточно прямым. Также при моделировании пренебрегается захватом снежной массы в процессе движения лавинного тела.

4.3. Численная схема Института гидродинамики СО АН СССР.

Численная схема используемой одномерной модели основана на полном уравнении Сен-Венана (3,4). Уравнения движения берутся в виде законов сохранения:

$$\frac{1}{g\omega}\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + 2V\frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \left[1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2\right]\frac{\partial Z}{\partial x} = \left[i_o + \frac{1}{B}\left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)_{h=const}\right]\left[\left(\frac{V^2}{C}\right) - \frac{Q|Q|}{K^2}\right] \quad (3)$$

$$B\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

Система разностных уравнений решается методом прогонки (методом линейной факторизации). В результате прямой и обратной прогонки получают значения Q и Z вдоль всего исследуемого участка для каждого расчётного интервала времени. Определение величин Q и Z для последней точки последнего участка производится на основе граничных условий, к которым добавляются граничные разностные уравнения. Далее производится обратная прогонка по соответствующим формулам. В модели используется неявная разностная схема, в которой вычисляются характеристики потока во всех узлах слоя в моделируемой области (x, t) , во всех створах в данный расчетный момент времени t (Грушевский М.С., 1982).

Компьютерная программа, составленная Институтом гидродинамики, дает возможность рассчитать русло без разветвлений или простейшую схему русел: слияние двух речных русел или раздвоение. В рамках работы над лавинами данные возможности программы не требовались, так как исследуемые лавины сходили одним потоком без ответвлений, но это может быть полезным при сходе нескольких лавин или разделении одной лавины рельефом местности. Программа широко апробировалась в ГГИ и в настоящий момент помимо рек программа также позволяет моделировать сход наносоводных селей.

4.4. Исходная информация для расчета неустановившегося движения воды.

Входная информация для расчета по одномерной модели неустановившегося движения включает в себя:

1. Длины расчетных участков.
2. Значения расчетных интервалов времени и шагов по длине.
3. Морфометрические характеристики русла.
4. Характеристики гидравлического сопротивления.
5. Начальные и граничные условия.
6. Боковой приток и отток.

Путь лавины *разбивается на расчетные участки*, в пределах которых наблюдается однородная закономерность изменения морфометрических и гидравлических характеристик. Для корректной разбивки объекта на участки необходимо, чтобы в пределах участка не было резкого изменения глубины или ширины русла. В случае, если на участке наблюдаются подобные изменения назначаются дополнительные границы участков.

Следующей задачей был *выбор расчетных интервалов времени и шагов (Δt) по длине (Δx)*. Количество расчетных шагов по длине в строгих методах обычно принимается целым и пропорциональным длине расчетного участка. При этом, чем больше выражен неустановившейся режим движения воды, тем расчетный участок разбивается на большее количество расчетных шагов по длине.

На границах участков задаются *морфологические характеристики*, которые плавно изменяются от верхнего створа к нижнему. Площадь поперечного сечения описывается с помощью изменения глубин и ширин лавинного тела на протяжении всего расчетного времени.

Важная задача – задание начальных и граничных условий. В качестве *начальных условий* задается начальный расход Q_0 и уровень поверхности лавинного тела Z_0 для каждого из назначенных створов. Установившееся движение задается с помощью некоего продолжительного периода, для которого характерен постоянный расход или уровень. Этот момент является необходимым условием для увязки и эффективной работы модели.

В качестве *граничных условий* на входном створе задается гидрограф $Q=f(t)$, а в замыкающем – ход изменения уровня $Z=f(t)$. Делается это для того, чтобы увязать систему расход-уровень, и получить в результате для каждого расчетного створа как расход, так и уровень.

Также для моделирования необходимо задать параметры модели. Самый сложный параметр – это коэффициент сопротивления подстилающей поверхности n . Коэффициент определяется обратным путем и является функционально зависимым параметром. Для моделирования лавин коэффициент сопротивления был рассчитан через формулу Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \quad (5)$$

где R – гидравлический радиус, а C – коэффициент Шези. Коэффициент Шези C может быть определен из гидравлической формулы расхода воды $Q=\omega C \sqrt{Ri}$, где ω – площадь живого сечения, i – уклон местности.

Глава 5. Создание информационной базы для моделирования и расчета.

5.1. Методика определения динамических характеристик по видеоматериалам.

В качестве исходных данных было выбрано 2 видео схода лавин различного генетического типа. Поиск места схода лавины осуществлялся с помощью программы Google Earth. В этой же программе были получены основные измерения длины участков и другие морфологические характеристики створов. Далее выбирались объекты на видео, которые служили для привязки траектории схода лавины к местности. Таким образом для каждого видео было выбрано несколько контрольных точек – дешифрируемых объектов, таких как отдельно стоящее дерево, столб, здания, дорога, скальные выступы и т.д. В этих контрольных точках назначались створы и вычислялось время, за которое фронт лавины проходил через них (табл.4).

Таблица 4. Данные прохождения фронта лавин через створы.

№ створа	Расстояние до створа, м	Время, за которое фронт лавины прошел расстояние, с	Скорость прохождения фронта лавины в створе, м/с
<i>Лавина мокрого снега (ViaBovile, Италия)</i>			
1	212	66	3,1
2	68	26	2,6
3	82	68	1,2
<i>Лавина перекристаллизованного и свежесвыпавшего снега (Cerro Catedral, Аргентина)</i>			
1	49	11	4,4
2	60	7	8,8
3	80	9	8,5

Благодаря измеренным расстояниям участков и времени прохождения фронта через контрольные точки, удалось рассчитать скорость прохождения лавины каждого назначенного участка. Помимо значений скорости по видеоматериалам удалось получить высоту лавинного тела. На первом видео видно, что высота лавины, сошедшей в Итальянских Альпах, достигает второго этажа жилого дома. Делается скриншот и измеряются высоты фронта лавины и известного объекта в пикселях (Осташов А.А., 2019). Исходя из того, что стандартная высота потолков в частном доме составляет 2,7 м, путем сравнения и сопоставления объектов на видео и карте, было выяснено, что максимальная высота лавины около 4,5 м. Тот же алгоритм был проделан с лавиной на Аргентинском курорте. На видео отчетливо видно, как лавина проходит через столб электропередач, высота которого 12 м. Максимальная высота фронта лавины составила около 15 м.

5.2. Выбор расчетных участков и интервалов по времени и длине.

Для каждой лавины было назначено по 3 расчетных створа. Схемы расчетных участков представлены на рис. 5, 6, а также в табл. 5, 6 указаны значения каждого участка, интервалов по длине и расчетных шагов по длине. Период схода лавины мокрого снега составил 160 секунд, лавины перекристаллизованного снега сошла за 40 секунд. Расчетный шаг по времени составил 1 секунду. Так как период расчета измеряется в секундах, а не в сутках и часах, как при обычном моделировании речных процессов, было необходимо добавить к расчету 100 секунд для увязки модели. Характеристики в эти начальные 100 секунд были неизменны.

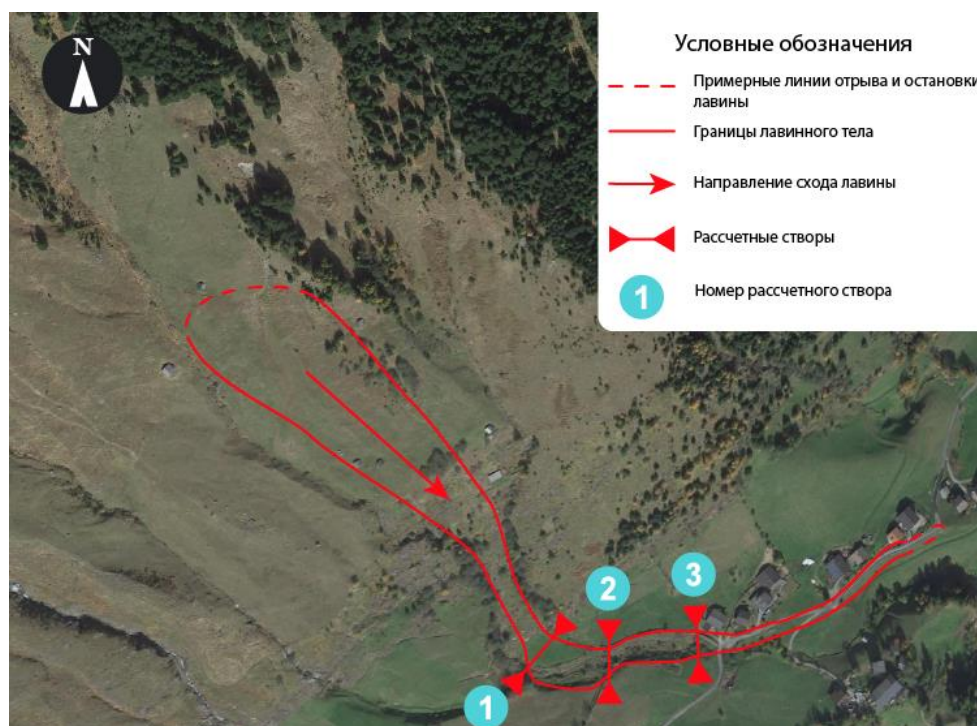


Рисунок 5. Схематичное изображение расчетного участка лавины мокрого снега (Италия)

Таблица 5. Характеристики расчетных участков
(Лавина мокрого снега, Италия)

№ участка	1	2
Длина участка, м	68,2	81,9
Кол-во интервалов	6	8
Протяженность расчетного интервала, м	11,4	10,2

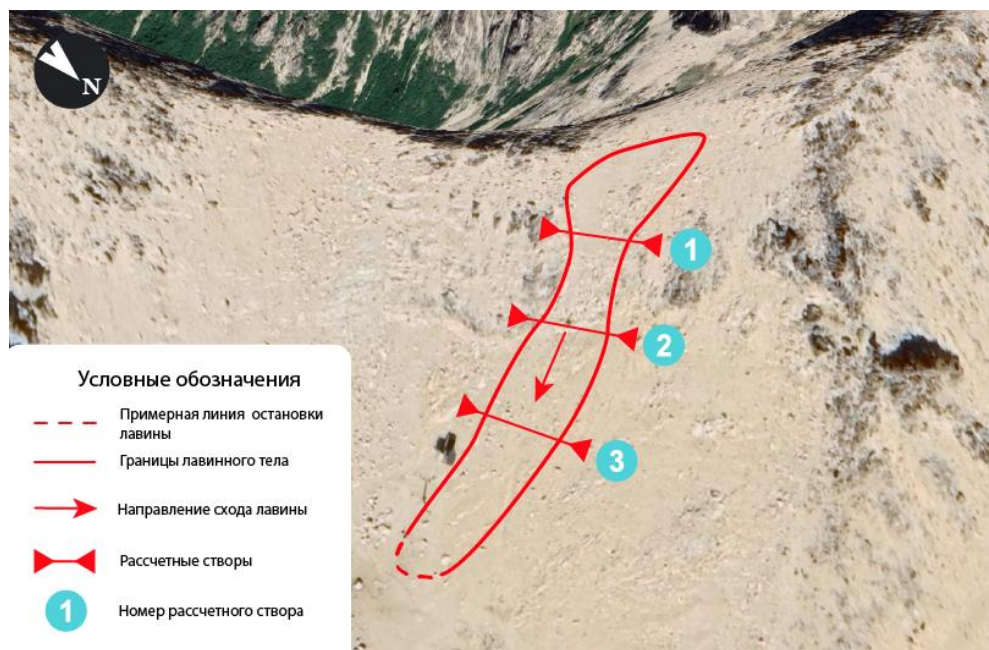


Рисунок 6. Схематичное изображение расчетного участка лавины перекристаллизованного снега (Аргентина).

Таблица 6. Характеристики расчетных участков
(Лавина перекристаллизованного снега, Аргентина)

№ участка	1	2
Длина участка, м	60	80
Кол-во интервалов	6	8
Протяженность расчетного интервала, м	10	10

Для каждой лавины было определено время прохождения фронта через створ, что в последствии позволило получить величину секунд, за которые лавина преодолела расчетный участок. Лавина мокрого снега прошла первый расчетный участок за 26 секунда, а второй – за 68 секунд. Второй участок лавина прошла медленнее, ее скорость начала снижаться в том числе из-за небольшого угла наклона местности в 12° . Лавина перекристаллизованного и сухого снега прошла расстояния в 60 и 80 м за 7 и 9 секунд соответственно.

5.3. Гидравлико-морфометрические характеристики.

С помощью программы Google Earth были получены отметки высоты и построены продольные профили схода лавин (рис. 7, 8) и поперечные сечения створов (рис.9, 10). На основе этих данных рассчитаны уклоны.



Рисунок 7. Продольный профиль траектории схода лавины мокрого снега (Италия).

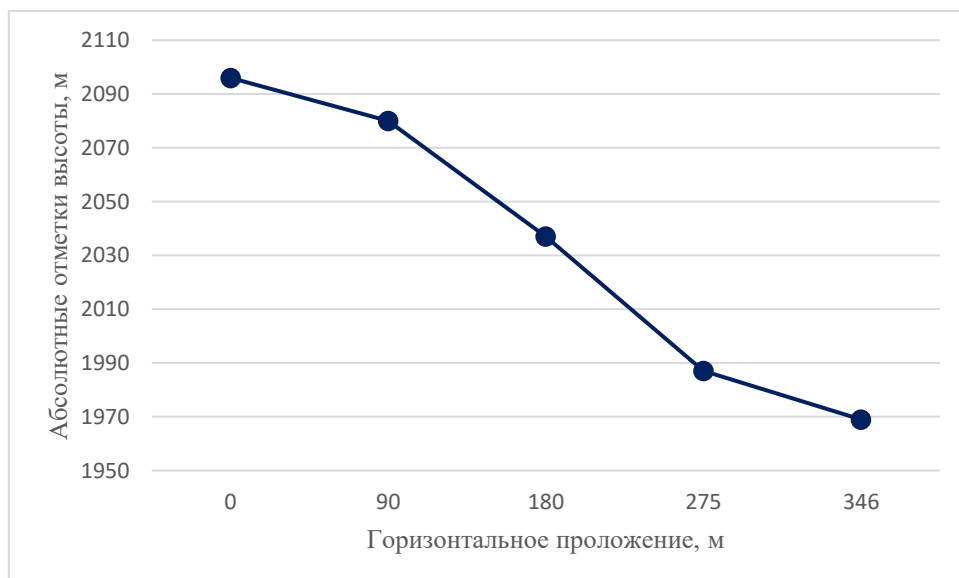


Рисунок 8. Продольный профиль траектории схода лавины перекристаллизованного снега (Аргентина).

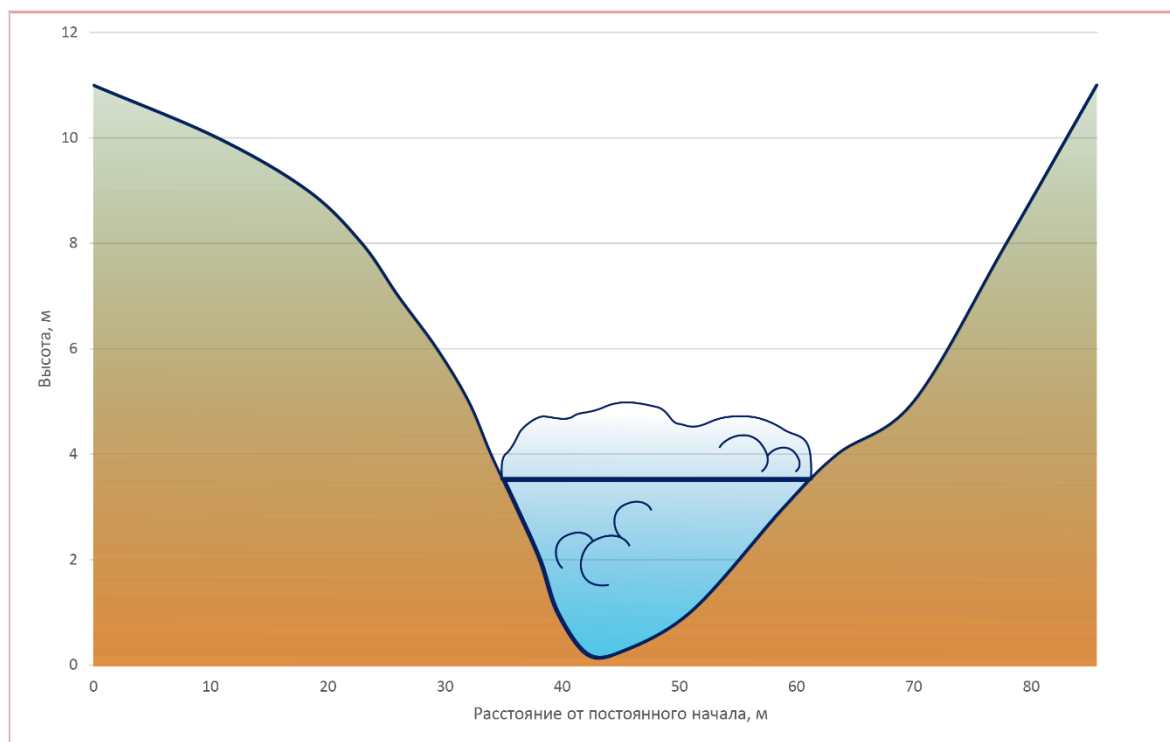


Рисунок 9. Поперечное сечение 1 створа лавины мокрого типа. Линия отделяет часть лавины, площадь которой используется в расчете коэффициента сопротивления.

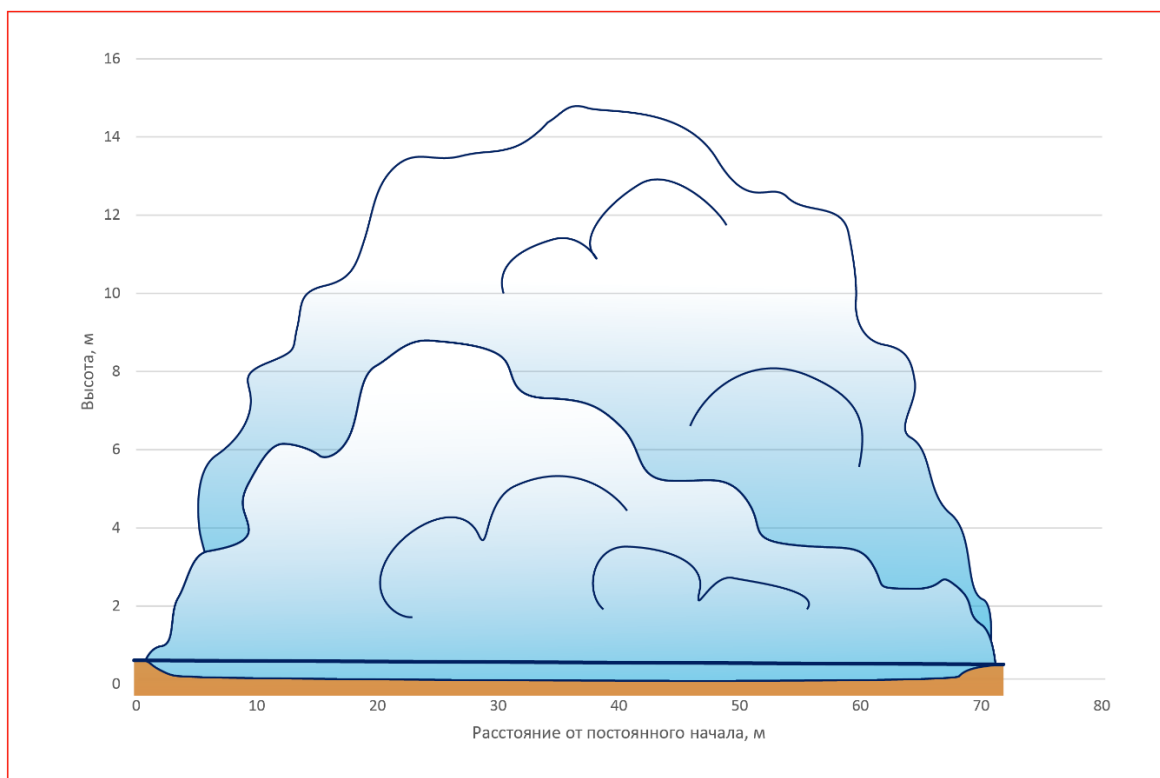


Рисунок 10. Поперечное сечение 3 створа лавины перекристаллизованного снега. Линия отделяет часть лавины, площадь которой используется в расчете коэффициента сопротивления.

Уклоны были вычислены для каждого расчетного участка и оставались неизменными на всем протяжении отдельного участка. Для лавины мокрого снега, сошедшей в Итальянских Альпах уклон на первом и втором расчетных участках, получился одинаковым и составил 12° . Для лавины перекристаллизованного снега на первом расчетном участке уклон был равен 35° , а на втором – 23° . Также программа Google Earth позволяет рассчитывать площади. Площадь зоны зарождения лавины мокрого снега – 3,7 га, зона зарождения лавины перекристаллизованного снега занимает 0,66 га.

5.4. Задание начальных и граничных условий.

При задании начальных условий на речных объектах выбирают период с минимальными колебаниями гидрографа. Лавина такого периода не имеет, поэтому он был создан вручную и составил 100 секунд, которые увязывают работу модели. В качестве начальных условий задавался постоянный минимальный уровень каждого лавинного тела, который составлял 1-2 м. Данные по уровням заносились в абсолютных отметках (табл.7). Далее вычислялся расход при этом уровне.

Таблица 7. Начальные условия при моделировании по рекам.

Объект	Створ	Начальные условия	
		Q_0 , $\text{м}^3/\text{с}$	H_0 , м
Лавина мокрого снега (Италия)	Створ 1	85	1361
	Створ 2	85	1346
	Створ 3	85	1328
Лавина перекристаллизованного и сухого снега (Аргентина)	Створ 1	594	2066
	Створ 2	594	2024
	Створ 3	594	1990

В качестве граничных условий заносился пик фронта – максимальная высота, которая также пересчитывалась в расход (рис.11). Таким образом, волна лавины задавалась минимальным количеством значений.

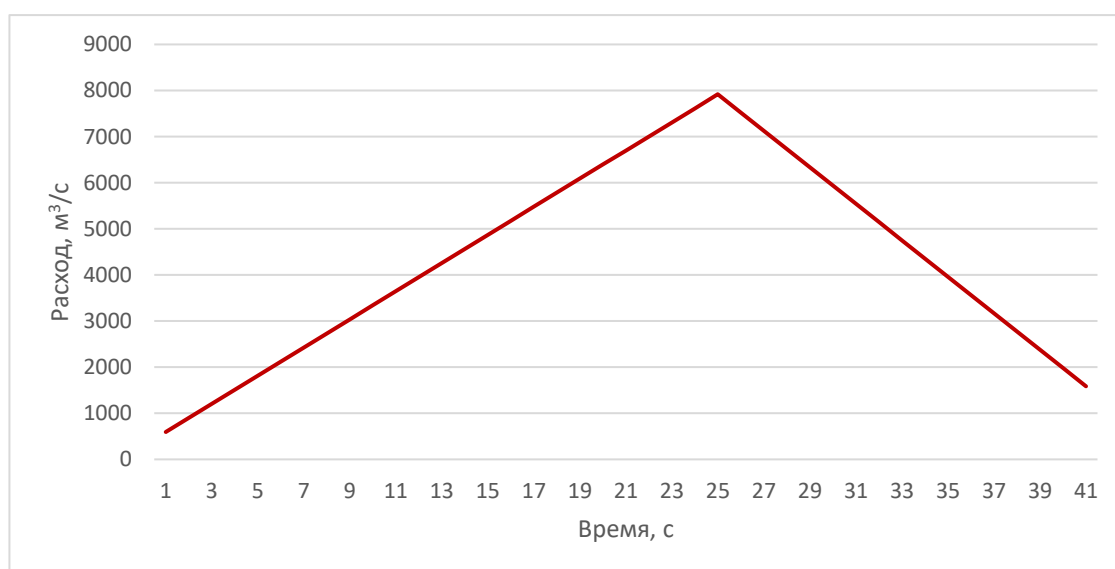


Рисунок 11. Ход изменения расхода, заданный в качестве граничных условий на 1 створе (лавины перекристаллизованного снега).

5.5. Задание коэффициентов сопротивления.

Трение лавины о подстилающую поверхность в большинстве случаев является трением снега о снег. При прохождении рыхлой лавины по участкам земли с отсутствием снежного покрова, лавина стирается, и сама покрывает путь своим снегом, что дает основание для принятия положения о постоянстве коэффициента трения на всем пути (**Козик**). Но массивные лавины способны сдирать слои почвы и вовлекать в лавинное тело, что необходимо учитывать при определении коэффициента трения.

Коэффициенты сопротивления определялись обратным путем, опираясь на данные скоростей, уклонов и площадей поперечного сечения тела лавины. В оболочку модели задается один коэффициент на всю длину расчетного участка.

Выражая из формулы (6) n , получаем

$$n = \frac{\omega R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{Q} = \frac{R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{V} \quad (6)$$

, где $R = \frac{w}{X}$, где w – площадь поперечного сечения той части лавинного тела, которая соприкасается с подстилающей поверхностью, а X – периметр этого соприкосновения. Уклон i определялся по разнице отметок абсолютной высоты створов деленную на расстояние между створами. Скорость v была вычислена по видеоматериалам. Рассчитанные параметры представлены в таблице 8.

Таблица 8. Рассчитанные характеристики для определения коэффициента сопротивления лавин.

	Мокрого снега (Италия)	Перекристаллизованного снега (Аргентина)
W	85,5	70,6
X	28	70,6
R	3,05	1
I	0,22	0,7
v	3,1	8,6
n	0,32	0,09
N*	0,22	0,40

N^* - коэффициент сопротивления, взятый для исследуемых лавин из таблицы (Лосев К.С., Божинский А.Н., 1987). Этот коэффициент зависит от площади зоны зарождения и среднего уклона местности. При сравнении рассчитанного сопротивления по формуле Маннинга n с N^* можно заметить, что для лавины мокрого снега N^* ниже полученного значения, а для лавины перекристаллизованного снега в 4 раза больше. Но коэффициент сопротивления лавины перекристаллизованного снега не может быть больше сопротивления лавины мокрого снега, так как у первой соприкосновение с поверхностью гораздо меньше. Поэтому параметр N^* нельзя использовать для моделирования.

5.6. Внесение данных в оболочку модели.

Вся исходная информация задаётся в виде следующих друг за другом массивов данных, которые разделяются условными числами. Ниже представлен образец задания массивов в модель (табл.9).

Таблица 9. Внесение данных в оболочку модели.

Массив	Пояснения
Информационный массив	Количество расчетных точек
	Начало расчета
	Конец расчета
	Расчетный шаг по времени
	Расчетный шаг округленный конец расчета
	Масштаб перехода в секунды
	Усл. Число
	Количество интервалов на участках. Разбиваются пропорционально длинам участков
	Длины участков
	Усл. Числа
	Количество шагов по времени(конец расчета делить на длину расчетного шага)
	Количество расчетных точек
	Усл. Число
Массив начальных значений расходов	Начальные расходы
Массив начальных значений уровней	Начальные уровни
Массив гидравнико-морфометрических характеристик	Число координат (начало и конец расчета)
	Длина от начала до расчетной точки
	Абс. Отметка дна в каждой расчетной точке участка
	Усл. Число (1-если расчет через коэф.шерох., 2- если через модуль расхода)
	Усл. Число коэф. шерох
	Расстояние до 1 створа кол-во точек по глубине
	Глубина, м
	Ширина, м
	Расстояние до 2 створа кол-во точек по глубине
	Глубина, м
	Ширина, м
Массив граничных условий	Усл. Число (сигнал, что записывается расход)
	Количество точек по времени, для которых задается расход
	Время (в строке не больше 10 значений)
	Расход(в строке не больше 10 значений)
	Тип подхода к вершине (1.1. – если приток есть, 1.0 -если притока нет)
	Усл. Число (запись уровня)
	Кол-во точек по времени, для которых задается уровень
	Время (в строке не больше 10 значений)
	Уровень(в строке не больше 10 значений)
	Количество расчетных точек
	Координаты расчетных точек по участкам
	Усл. Число (столько сколько участков)
	Уровень на начальный момент времени
	Номера правых концов расчетных участков

5.7. Вывод результатов.

Программой предусмотрен вывод результатов во всех точках. Вывод производится в формате .text, что позволяет проводить дальнейшие расчеты и построения графиков в других программах. Через интервалы Δt выдаётся такая информация, как:

1. момент времени t ;
2. общее число участков M ;
3. порядковый номер точки, начиная с нуля I ;
4. координата точки X и соответствующие ей значения переменных во всех точках для M отрезков. На печать выдаются h , Q , Z , V , B , ω , K , C , R , Fr (табл.10).

Таблица 10. Пример вывода результата расчета в оболочке модели.

НАЧАЛО РАСЧЕТА									
ВРЕМЯ	B	CEK	T=	1					
I	X	Z	Q	V	W	B	K	R	FR
1	0	361,785	85,500	3,031	28,204	21,27	151,55	1,285	0,706
2	68,2	346,750	91,296	2,454	34,838	23,83	200,50	1,424	0,420
3	0	346,750	91,296	2,454	34,838	23,83	183,79	1,424	0,420
4	81,9	328,700	99,462	2,030	42,112	27,52	229,66	1,497	0,275
ВРЕМЯ	B	CEK	T=	2					
I	X	Z	Q	V	W	B	K	R	FR
1	0	361,830	85,500	2,846	30,039	21,96	164,80	1,326	0,604
2	68,2	346,783	94,520	2,533	36,039	24,22	209,89	1,450	0,440
3	0	346,783	94,520	2,533	36,039	24,22	192,40	1,450	0,440
4	81,9	328,700	104,02	2,362	42,112	27,52	229,66	1,497	0,372

Глава 6. Результаты моделирования

В результате модель рассчитала весь путь лавинного тела на выбранных участках. Полученные данные в замыкающих створах представлены на графиках (Рис.12-15).

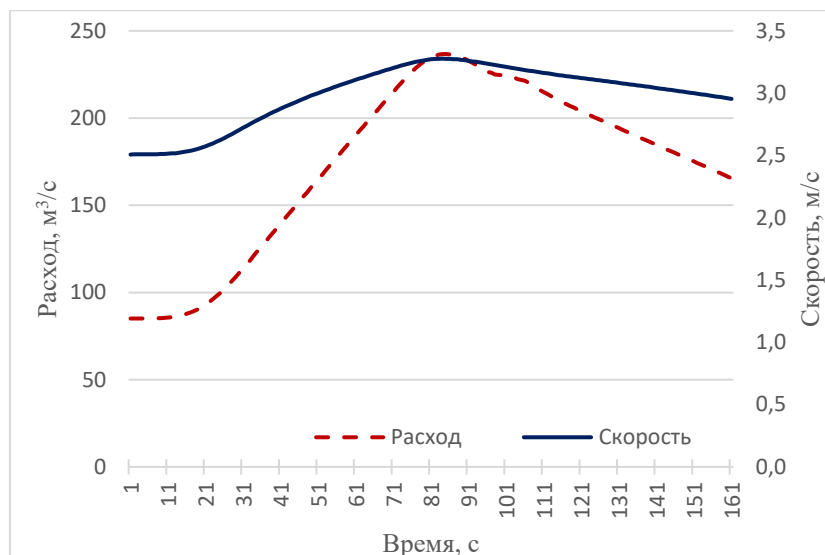


Рисунок 12. Совмещенный график расхода и скорости лавины на 2 створе (ViaBovile, Италия).

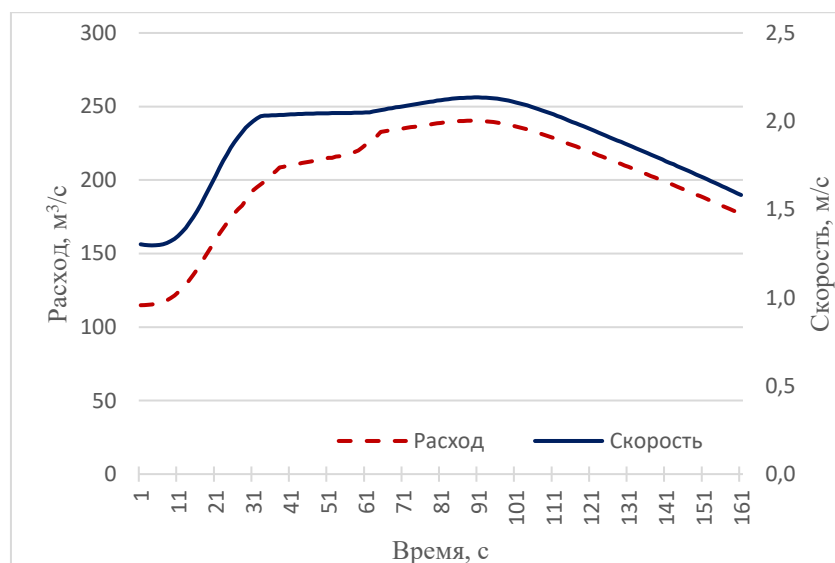


Рисунок 13. Совмещенный график расхода и скорости лавины на 3 створе (ViaBovile, Италия).

Как видно на графиках 5,6 лавина мокрого снега имеет стремительное увеличение расхода в первые 80 секунд. Далее наблюдается медленное уменьшение значений расхода и скорости. Лавина медленно движется сплошной вязкой массой по местности с уклонов в 12°. Максимальный расход лавины достигает 240,3 м³/с.

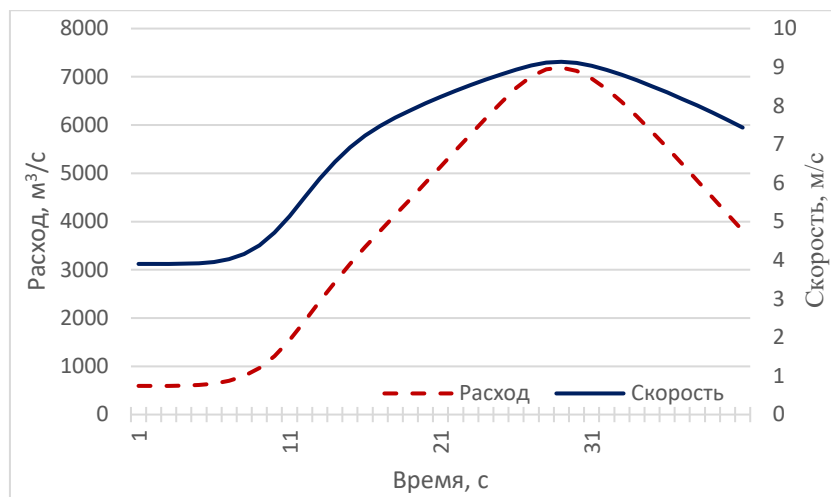


Рисунок 14. Совмещенный график расхода и скорости лавины на 2 створе (Cerro Catedral, Аргентина).

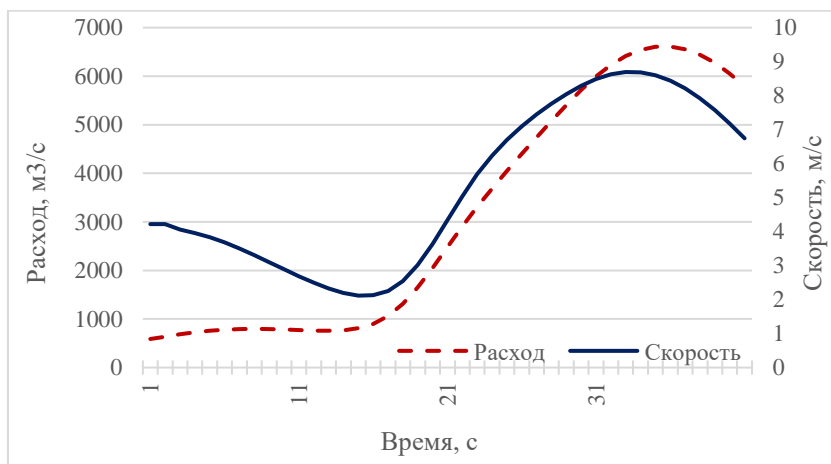


Рисунок 15. Совмещенный график расхода и скорости лавины на 3 створе (Cerro Catedral, Аргентина).

Лавина перекристаллизованного и сухого снега прошла по всем створом мощной волной, расход которой достиг своего максимума на 2 створе и составил 7190 м³/с. За 7 секунд пик расхода прошел расстояние в 80 м.

Для сравнения результатов моделирования с натурными данными был выбран показатель скорости движения лавинного тела, так как скорость, с которой проходит фронт лавины через назначенные створы, можно получить из видеосъемки объекта (Табл.11). Как видно из таблицы результаты расчета модели вполне удовлетворительны и мало отличаются от натурных данных, немного завышая их значения. Также модель позволяет получить такую характеристику, как расход лавины. В данной работе максимальный расход лавины мокрого снега равен 240 м³/с, а расход лавины перекристаллизованного снега составил 7190 м³/с.

Таблица 11. Сравнение скорости лавины в створах.

Лавина мокрого снега (ViaBovile, Италия)		
№ створа	Скорость по видеоданным (м/с)	Скорость, рассчитанная по модели (м/с)
1 створ	3,1	3,32
2 створ	2,6	3,19
3 створ	1,2	1,34
Лавина перекристаллизованного и свежеснежного снега (Cerro Catedral, Аргентина)		
1 створ	4,4	4,58
2 створ	8,8	9,14
3 створ	8,5	8,69

Так же видеоматериалы и GoogleEarth позволяют определить дальность выброса лавин. Для лавины мокрого снега дальность выброса составила 178 м, для лавины перекристаллизованного снега - 75 м. Чтобы убедиться в реальности смоделированных скоростей, основываясь не только на данных видеосъемки, были рассчитаны дальности выброса по следующим формулам:

$$d = \frac{V_B^2 - V_A^2}{2a} \quad (7)$$

$$a = g * \sin(\alpha) - \mu * g * \cos(\alpha) \dots \dots \dots (8)$$

,где d дальность выброса (м), V_A , V_B - скорости в начальной и конечной точки соответственно ($V_B = 0$ м/с, так как движение лавины останавливается, V_A задавалась по результатам моделирования, a – ускорение (м/с²), g – ускорение свободного падения (9,8 м/с), μ – коэффициент трения.

Расчет дал также удовлетворительные результаты, а именно 173 м для лавины мокрого снега (ViaBovile, Италия) и 71 м для лавины перекристаллизованного снега (Cerro Catedral, Аргентина).

Заключение

В ходе данной работы были выполнены все поставленные задачи и достигнута основная цель: рассчитать с помощью одномерной модели, на основе численной схемы Института гидродинамики, основные динамические характеристики исследуемых лавин различного типа.

Был представлен аналитический обзор классификаций лавин, методов расчета лавин с помощью математического моделирования. Рассмотрена используемая в расчетах одномерная модель неустановившегося движения, ее численная схема, а также основные требования и допущения к исходной информации для модели.

Создание информационной базы для моделирования осуществлялось с помощью материалов видеосъемки схода лавин и программы Google Earth. Были определены все морфометрические характеристики исследуемых объектов, заданы начальные и граничные условия. Рассчитаны коэффициенты сопротивления для каждого лавинного тела и выяснено, что этот параметр для лавины мокрого снега составляет 0,32, а для лавины перекристаллизованного снега в 3 раза меньше – 0,09. Происходит это из-за того, что во-первых, сухой снег менее связный и сильнее насыщен воздухом, во-вторых, лавина перекристаллизованного снега имеет меньшую площадь контакта с подстилающей поверхностью.

Представленные результаты моделирования сравнивались с натурными данными по таким характеристикам как скорость и дальность выброса. Смоделированные значения оказались удовлетворительными. Также, благодаря моделированию, удалось получить такую динамическую характеристику как объемный расход лавины, максимальное значение которого для лавины мокрого снега составило $240 \text{ м}^3/\text{с}$, а для лавины перекристаллизованного снега - $7190 \text{ м}^3/\text{с}$.

В результате работы было выявлено следующее: одномерную модель неустановившегося движения можно использовать как для водных объектов, так и для лавин, причем разного генетического происхождения.

Список литературы

Монографии:

1. Виноградов Ю.Б. , Виноградова Т.А. «Современные методы в гидрологии», издательство Академия, Москва, 2008 г.
2. Войтковский К.Ф. «Лавиноведение», 1989.
3. Грушевский М.С. «Неустановившееся движение воды в реках и каналах». – Л.: Гидрометеиздат, 1982.
4. Козик С.М. «Расчет движения снежных лавин», Гидрометеорологическое издательство, Ленинград, 1962.
5. Лосев К.С., Божинский А.Н. «Основы лавиноведения» Гидрометиздат, Ленинград, 1987.
6. Mair R., Naitz P. «Lawine», 2013.
7. Москалев Ю.Д. «Динамика снежных лавин и снеголавинные расчеты» - Л., 1977.
8. Осташов А.А, Выпускная квалификационная работа на тему: «Динамические характеристики лавин разных генетических типов», 2019.

Статьи в сборниках:

1. Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В. Математическое моделирование динамики снежных лавин. Сборник научных трудов Высокогорного геофизического института, Выпуск 100, Уфа, 2017, с. 97-106.
2. Виноградова Т.А., Никифоровская В.С. О математическом моделировании формирования процессов тепломассопереноса в речных и озерно-речных системах. Тр. IV Всесоюз. науч. конф. Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов. Москва, 15-18 сент. 2015, с.102-106.

Учебно-методические пособия:

1. Виноградова Т.А., Казаков Н.А., Виноградов А.Ю., Генсиоровский Ю.В., Пряхина Г.В. «Опасные гидрологические явления», СПб, 2017.

Словари:

1. Гляциологический словарь. (под ред. В.М. Котлякова), Гидрометеиздат, 1984, 527 с.

Статьи в журналах:

1. Виноградов А.Ю., Никифоровский А.А. «Анализ соответствия критериев качества моделирования процессов формирования стока малых рек», Вестник МГОУ. Серия: Естественные науки, 2015 г.
2. Alvarado A. , Robinson D. One-Dimensional Versus Two-Dimensional Modeling, 2012.
3. Barpi F., Borri-Brunetto M., Veneri L. D. Cellular-automata model for dense-snow avalanches. Journal of Cold Regions Engineering, 21 (4), 2007.
4. Naaim M., Gurer I. Two-phase numerical model of powder avalanche theory and application. Natural Hazards, (117):129–145, 1998.

Ресурсы сети Интернет:

1. <https://www.google.ru/maps>
2. <https://www.google.com/earth/>